

Thermographie infrarouge photothermique appliquée à la caractérisation thermophysique de tôles grenillées

Damien LEGAIE¹, Guillaume MONTAY², Vincent KLOSEK³, Hervé PRON¹ et Christian BISSIEUX¹

¹ Laboratoire de Thermophysique (URCA/UTAP/LTP, EA 3802)
UFR Sciences Exactes et naturelles, BP1039, 51687 Reims Cedex

² Institut Charles Delaunay (UTT/ICD/LASMIS, FRE CNRS 2848)
Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie, BP10010, Troyes

³ Laboratoire Léon BRILLOUIN, CEA-CNRS, Centre d'Etudes de Saclay, 91191 GIF-sur-Yvette Cedex
damien.legaie@univ-reims.fr

Résumé :

Dans le présent article, nous avons entrepris une étude sur les effets engendrés par le grenailage de précontrainte sur la valeur de la conductivité thermique de deux aciers inoxydables austénitiques (316L, URANUS B25). Les intensités de grenailage étudiées sont courantes et caractérisées par leurs débits (3, 4 et 5 bars), avec deux temps de grenailage significatifs (20 et 40s) ainsi que par des distances buse/pièce de 100 et 150 mm. Une caméra de thermographie infrarouge associée à une détection synchrone ont permis de déterminer la réponse de chacun des échantillons soumis à une excitation laser. Des identifications sur les profils en température ont ensuite permis d'estimer la conductivité thermique. Des comparaisons avec les valeurs fournies par Arcelor ont mis en évidence des variations de la valeur de la conductivité thermique en fonction du niveau de grenailage, qui a été quantifié par une mesure du taux de contraintes résiduelles introduites.

Abstract :

The photothermal infrared thermography is used in Non-Destructive Testing on shot-peened samples. The aim of this article is to study the effect of residual stress on the thermal conductivity value. The thermal conductivity is identified by using a series of maps after lock-in detection and a parameter estimation by adjustment with a two dimensional axisymmetrical model.

Mots-clefs :

Grenailage de précontrainte ; contraintes résiduelles ; conductivité thermique

1 Introduction

Le grenailage de précontrainte est un traitement de surface mécanique qui consiste à perturber la structure initiale du matériau afin d'augmenter entre autres sa résistance mécanique, les impacts de billes modifiant la structure par déformation des grains. Or la diffusion de la chaleur dépend de plusieurs paramètres comme la taille des grains et leurs empilements dans la structure cristalline. Une déformation mécanique partielle de la structure doit donc influencer l'aptitude du matériau à conduire la chaleur. Dans le présent travail, nous montrons l'ensemble des résultats issus d'un grenailage usuel sur un échantillon d'acier URB25.

2 Principe de la mesure par thermographie infrarouge photothermique

La technique consiste à exciter à l'aide d'un laser modulé en puissance la face avant d'une tôle d'acier grenillée. Une caméra de thermographie infrarouge est placée face à

l'échantillon et enregistre alors les cartes numériques de températures à sa surface. A partir de ces données, une procédure de détection synchrone nous donne les cartes en amplitude et en phase de la température. La méthode impose toutefois l'application sur le métal d'un revêtement émissif (mince couche de peinture noire) dont il faut identifier les propriétés thermophysiques pour estimer ensuite la conductivité thermique de l'acier.

Un modèle construit sur l'équation de diffusion de la chaleur, considérant l'échantillon bicouche (matériau + peinture) avec une géométrie bidimensionnelle axisymétrique, nous permet en appliquant une transformée intégrale de type Hankel de déterminer l'évolution de la température dans l'échantillon. Dans un premier temps, une méthode inverse utilisant l'algorithme de Gauss-Newton nous retourne une estimation des propriétés du revêtement sur un échantillon de référence. Dans un second temps, nous réutilisons la méthode inverse pour identifier la conductivité thermique d'un échantillon grenaillé.

3 Dispositif de mesure

Le faisceau laser est issu d'un YAG, doublé en fréquence, de longueur d'onde 532 nm et de puissance 120 mW (données constructeur). Un prisme permet de renvoyer le faisceau modulé par une cellule acousto-optique sur l'échantillon. Le modulateur est asservi par une fonction sinusoïdale générée sous *Labview*TM. Une caméra infrarouge CEDIP IRC 320-4LW est utilisée pour la mesure des variations de la température. Une photodiode permet de récupérer le signal de référence pour réaliser la détection synchrone. Une carte d'acquisition PCI-MOI-16E-4 *National Instrument*TM permet de piloter l'ensemble du dispositif, la détection synchrone est réalisée en post-traitement par le biais d'un programme sous *Labview*TM. Pour caractériser la peinture noire, nous avons réalisé des mesures sur trois supports différents (un échantillon de Fer ARMCO, un échantillon brut de 316L ainsi qu'un échantillon brut d'acier URB25), leur composition chimique ainsi que leurs propriétés mécaniques et thermiques sont rassemblées dans les tableaux 1, 2 et 3 ci-dessous.

Composition chimique	C	Mn	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu
316L	0,018%	1,7%	0,001%	10,2%	16,5%	2,1%	0,07%	0,1%
URB25	0,008%	0,7%	<0,001%	17,7%	20,3%	6,1%	0,20%	0,7%

Tableau 1 : Composition chimique

Caractéristiques mécaniques à 20°C	Limite d'élasticité $R_{0,2}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Module de Young E (GPa)	Module de Cisaillement G (GPa)	Masse volumique (kg.m^{-3})
Acier 316L	220	520/670	200	77	7950
Acier URB25	300	650	195	75	8000
Fer ARMCO	/	/	/	/	7800

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques à 20°C

Propriétés thermiques à 20°C	Capacité thermique massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Acier 316L	500	15
Acier URB25	480	13
Fer ARMCO	450	73,2

Tableau 3 : Propriétés thermiques à 20°C

4 Le problème direct

Géométrie du problème : l'échantillon d'épaisseur ($d-l$), supposé homogène et isotrope dans la région étudiée est recouvert d'une couche de peinture d'épaisseur l . La face avant est celle qui reçoit l'impact laser. L'axe de symétrie (z) est l'axe du faisceau incident.

Equation de diffusion : l'équation de la chaleur pour un milieu homogène et isotrope s'écrit :

$$\Delta T(r, z, t) - \frac{1}{a} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = - \frac{q(r, z, t)}{k} \quad (1)$$

Avec a : diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) ; k : conductivité thermique du matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$) ; q : source de chaleur ($W.m^{-3}$) et T : température (K).

En considérant la géométrie du problème comme bidimensionnelle axisymétrique en régime sinusoïdal établi, nous résolvons l'équation (1) en combinant une transformée intégrale de type Hankel avec une réponse harmonique ; cette méthode a été développée par Y.Gillet et C.Bissieux [1]. On obtient alors une expression de l'amplitude complexe de la température en tout point de l'échantillon:

$$T(r, z) = \int_0^\infty \int_0^l H(\delta, z|z') \cdot \bar{q}(\delta, z) \cdot J_0(\delta r) \cdot \delta \cdot (d\delta) \cdot (dz') \quad (2)$$

Avec δ : variable de Hankel (m^{-1}) ; r : coordonnée radiale (m) ; J_0 : fonction de Bessel.

Les réponses harmoniques $H(\delta, z|z')$ sont déterminées par la méthode proposée par Burgener et Reedy [2], et étendue à un milieu bicouche par Madison et Mac Daniel [3]. Le terme source $q(r, z)$ est approximé par un profil gaussien avec une symétrie de révolution [1] et une exponentielle décroissante dans la profondeur.

5 Résultats expérimentaux et discussions

5.1 Propriété du revêtement émissif

Pour caractériser le dépôt mince de peinture noire sur les échantillons de référence, une mesure de l'épaisseur du film a été effectuée ; une moyenne arithmétique a été admise avec une erreur sur la mesure de $\pm 1 \mu m$. Des mesures du rayon à $1/e$ du faisceau laser ont été nécessaires, le modèle étant fortement sensible à cette valeur. La méthode du rasoir suivie d'une identification paramétrique sur le profil expérimental a permis d'estimer le rayon du faisceau avec son intervalle de confiance. L'algorithme de Levenberg-Marquardt nous donne un rayon de $(426 \pm 11) \times 10^{-6} m$. En utilisant les données issues des 3 supports ainsi qu'une méthode inverse utilisant l'algorithme de Gauss-Newton, nous avons obtenu une conductivité thermique ($k_{peinture}$) de $0,10 \pm 0,02 W.m^{-1}.K^{-1}$.

5.2 Identification de la conductivité thermique d'un échantillon d'acier URB25 grenailé

Paramètres grenailage	Type de billes	Diamètre des billes	Dureté des billes	Temps de grenailage	Débit de grenailles	Distance buse/échantillon
Acier URB25	Inox	de 0,15 à 0,45 mm	40 / 43 HRC	20 s	5 bar	100 mm

Tableau 4: Paramètres du grenailage

Dimensions de l'échantillon grenailé : $l=3,7\text{cm}$, $L=7,6\text{cm}$, épaisseur= $0,4\text{cm}$. Le grenailage (Tableau 4) a été effectué au sein de la société RÖSLER de Sens.

L'identification est menée à partir d'une distribution spatiale de la température complexe et d'une méthode inverse de type Gauss-Newton. Les points expérimentaux résultent d'une série d'acquisition de 200 images, de dimensions 160×120 pixels, à une fréquence caméra de 10Hz et pour une fréquence de modulation du faisceau de 1Hz.

La conductivité thermique identifiée dans la zone considérée de la partie grenailée de l'acier URB25 est donc : $k_{\text{acier grenailé}} = (19 \pm 2) \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, soit une valeur de conductivité supérieure à la valeur nominale ($k_{\text{acier brut}} = 13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Le profil théorique et le profil expérimental sont donnés dans la figure 1 ci-après.

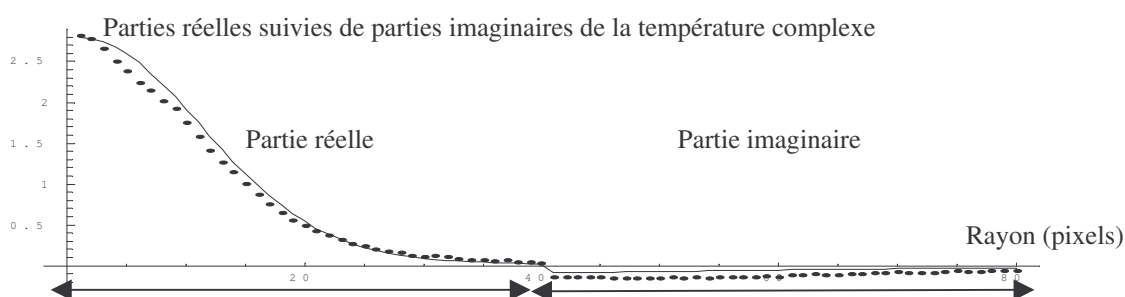


FIG.1-Profil théorique (trait continu) et points expérimentaux, obtenus sur l'acier URB25 grenailé, de la température complexe

5.3 Profil des contraintes résiduelles dans l'échantillon de URB25 grenailé

Les contraintes résiduelles introduites sont le résultat de déformations plastiques durant le grenailage. Deux méthodes ont été choisies pour la détermination des contraintes résiduelles : d'une part la technique du trou incrémental [4] (destructive) et d'autre part la diffraction des neutrons [5, 6] (non-destructive).

Les mesures par trou incrémental ont été réalisées au LASMIS (Université de Technologie de Troyes). Nous avons utilisé pour le perçage une fraise deux dents, de diamètre 2 mm. Les incréments de perçage (20, 40, 80, 120, 160, 200, 300, 400, 500, 600, 800 et 1000 μm) ont été optimisés afin d'avoir le maximum de valeurs dans la couche superficielle. Pour les mesures, une rosette extensométrique de type CEA a été collée sur l'échantillon. Pour chaque incrément, on mesure les déformations. Disposant ensuite des coefficients de calibration il est possible de remonter à l'état de contrainte du matériau à partir de l'état de déformation enregistré par les jauges [4]. Le profil de contraintes suivant la profondeur obtenu pour l'acier URB25 grenailé est représenté figure 2.

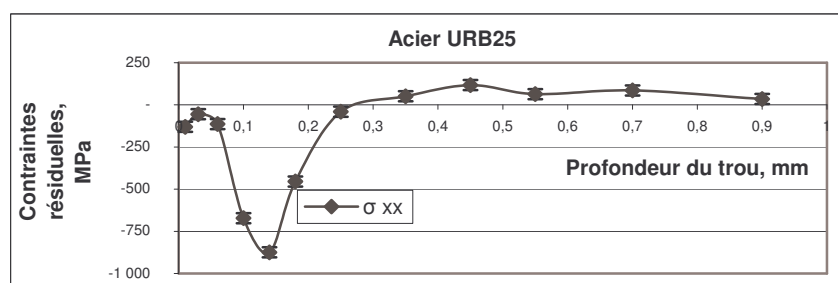


FIG.2-Distribution des contraintes résiduelles totales obtenue par la méthode du trou incrémental

La mesure des déformations par diffraction est basée sur l'évaluation précise de la distance interréticulaire $d_{(hkl)}$ de plans de diffraction (hkl), qui agit comme une jauge de déformation. Sous l'effet d'une contrainte, la distance $d_{0(hkl)}$ initiale varie de Δd . En différenciant la loi de Bragg, la mesure de déformation est reliée au déplacement $\Delta 2\theta$ de la raie de diffraction par rapport à sa position de référence $2\theta_0$:

$$\varepsilon = \frac{d_{(hkl)} - d_{0(hkl)}}{d_{0(hkl)}} = -\cotg \vartheta_0 \cdot \Delta 2\vartheta$$

Les lois de la mécanique des milieux continus (loi de Hooke généralisée) permettent ensuite de déterminer les valeurs de contraintes.

Les mesures par diffraction de neutrons ont été réalisées sur le diffractomètre G5.2 du Laboratoire Léon Brillouin (CEA-Saclay) [5].

La longueur d'onde du faisceau de neutrons était de 2,86 Å pour utiliser les plans (111) de l'austénite comme jauge de déformation (angle de diffraction 2θ voisin de 86°). Le volume de jauge quasi-parallélépipédique, défini par l'intersection des faisceaux incident et diffracté, était de $0,5 \times 0,5 \times 10 \text{ mm}^3$ (correspondant à une résolution spatiale de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ en profondeur). Les mesures de déformations ont été effectuées selon les trois directions xx (direction transverse), yy (direction de laminage) et zz (normale), considérées comme les directions principales.

L'échantillon de référence utilisé était l'échantillon brut de laminage. Celui-ci a été mesuré dans les mêmes conditions que l'échantillon grenailé, ce qui a en outre permis de corriger les aberrations instrumentales présentes lorsque le volume de jauge n'est pas totalement immergé dans la matière. De plus, cet échantillon de référence n'était pas exempt de contraintes résiduelles. Les résultats présentés correspondent donc uniquement aux contraintes résiduelles réellement introduites par le traitement de surface.

Le profil des contraintes ainsi obtenu est représenté figure 3.

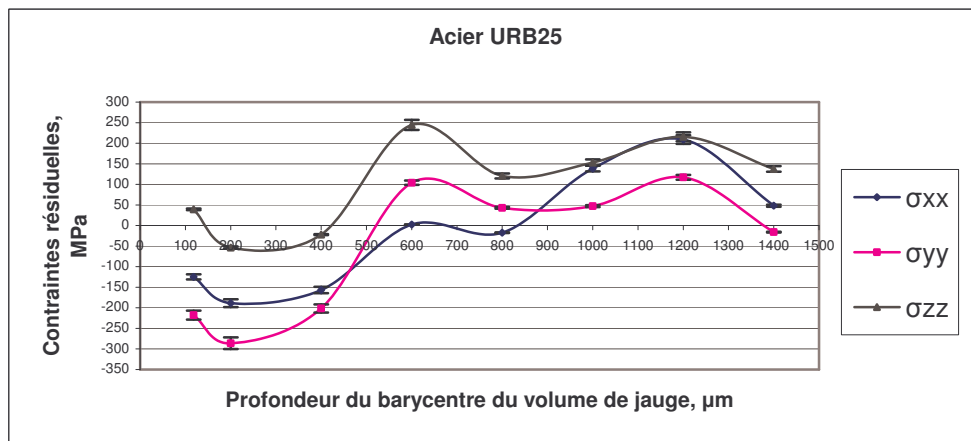


FIG.3-Distribution des contraintes résiduelles obtenue par diffraction de neutrons

5.4 Analyse des résultats

Les résultats obtenus par thermographie infrarouge photothermique nous révèlent donc une modification de la valeur de la conductivité thermique après le grenailage. D'un point de vue expérimental, la méthode nécessite un dépôt de peinture le plus homogène possible en épaisseur. En ce qui concerne les mesures de contraintes résiduelles, la différence entre les

résultats issus des deux méthodes s'explique par le fait que les mesures par trou incrémental (figure 2) nous donnent une information sur les contraintes résiduelles totales tandis que celles issues des mesures par diffraction de neutrons (figure 3) nous permettent d'accéder aux contraintes résiduelles uniquement dues au grenaillage. Ces mesures sont donc complémentaires pour cette étude. Afin de quantifier le grenaillage nous avons retenu de ces distributions de contraintes résiduelles les paramètres pertinents ci-après : la contrainte maximale, la profondeur de la contrainte maximale, la contrainte en surface et la distance entre la zone de compression et la zone de traction.

6 Conclusions

Ces premières expériences sur cet échantillon grenaillé nous ont permis d'une part, de mettre en évidence l'influence de ce traitement de surface mécanique sur la conductivité thermique et d'autre part, de caractériser l'effet induit par le grenaillage. De nouvelles mesures sur d'autres échantillons, ayant subi d'autres types de grenaillages, sont nécessaires pour rechercher une corrélation entre le taux de contraintes résiduelles et la valeur de la conductivité thermique [7].

Références

- [1] Y. Gillet, C. Bissieux 1999 Diffusion harmonique de la chaleur appliquée au contrôle non destructif par méthodes photothermiques, *Int.J.Therm.Sci.* **38**, 530-540
- [2] M.L. Burgener, R.E Reedy 1982 Temperature distributions produced in a two-layer structure by a scanning cw laser or electron beam, *J.Appl.Phys.***53**(6)
- [3] M.R Madison, T.W McDaniel 1989 Temperature distributions produced in an N-Layer film structure by static or scanning laser or electron beam with application to magneto-optical media, *J.Appl.Phys.***66**(12)
- [4] G. Montay 2001 Thèse, Université de Technologie de Troyes
- [5] V. Klosek, M.H. Mathon, V.Ji, R.Chiron 2006 "DIANE: la détermination des contraintes par diffraction de neutrons au Laboratoire Léon Brillouin", *Congrès MATERIAUX 2006 (Dijon)*
- [6] I.C. Noyan, J.B. Cohen 1987 Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation, *Materials Research Engineering*
- [7] H. Pron, C. Bissieux 2004 3-D thermal modelling applied to stress-induced anisotropy of thermal conductivity, *Int.J.Therm.Sci.* **43**, 1161-1169

Les auteurs tiennent à remercier la Région Champagne-Ardenne pour son soutien financier, la société Industeel (Groupe Arcelor) ainsi que la société RÖSLER.